

Для выравнивания симметрии процессов нагрева и охлаждения необходимо ограничить максимальную мощность, которая может быть подана в нагрузку. Для этого необходимо установить значение максимальной мощности в пределах от 1 до 99 %.

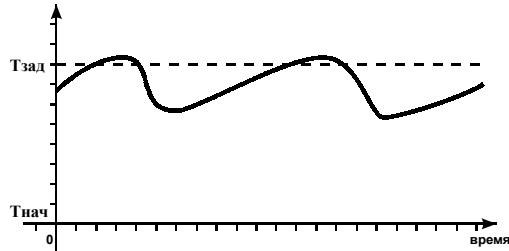


Рис.9

Если колебательный процесс будет соответствовать Рис.9, значит мощность нагревателей в системе недостаточна для компенсации тепловых потерь и поддержания точной температуры.

Не стоит забывать контролировать текущую мощность в нагрузке по включению точки в правом разряде индикатора. Таким способом можно определить причину недостатка мощности – или регулятор не может быстро установить максимальную мощность в нагрузке, или нагреватели просто не в состоянии обеспечить требуемый нагрев.

Настройка параметров ПИД-закона в регуляторах температуры МикРА.

Киев 2003 г.

Регуляторы температуры МикРА предназначены для применения в условиях промышленного производства. Специфические требования, предъявляемые к подобному оборудованию, определяются жесткими условиями эксплуатации и необходимостью обеспечения долговременной работоспособности при минимальном техническом обслуживании.

Устойчивость приборов к воздействию факторов окружающей среды, таких как широкий диапазон температур, механические воздействия, вибрация, воздействие агрессивных жидкостей и газов, обеспечивается применением специальных материалов корпусных деталей, надежных электронных компонентов индустриального применения, конструктивными решениями.

Долговременная стабильность работы оборудования определяется, кроме специальных схемных решений, высокой степенью автоматизации настройки и калибровки параметров оборудования. Применение в регуляторах современных микропроцессоров, позволяет большинство операций по калибровке и настройке оборудования реализовать программно, тем самым, возложив эти операции на сами приборы.

Основной задачей, которую выполняет регулятор температуры в составе промышленного оборудования, является задача поддержания определенной температуры некоторого объекта регулирования, который сам является частью данного оборудования.

Поскольку этот объект чаще всего сам выполняет какие-то функции, взаимодействуя с другими элементами оборудования и внешней средой, то его параметры могут меняться в процессе работы. Изменение теплоотдачи, теплопотерь, мощности нагревателей или массы объекта ведет к изменению температурного режима объекта регулирования.

Любой объект регулирования характеризуется определенными свойствами. Статические характеристики объекта управления определяют связь между установившимися значениями входа и выхода объекта. По виду статических характеристик объекты делятся на линейные и нелинейные. Динамические характеристики объекта определяют его поведение при скачкообразных изменениях входного воздействия. Большинство промышленных объектов управления имеют запаздывание, которое объясняется конечной скоростью распространения потоков тепла (транспортное запаздывание).

Теория автоматического регулирования сегодня позволяет создать систему управления практически для любого объекта. Но лишь при наличии достаточно точной математической модели объекта можно спроектировать высококачественную систему управления этим объектом. Причем, согласно принципу Эшби, сложность управляющего устройства должна быть не ниже сложности объекта управления. Поэтому, иногда, дешевле правильно спроектировать объект регулирования, чем создавать для него индивидуальную систему управления.

Кроме того, в условиях промышленного производства желательным является унификация применяемых приборов и комплектующих. По этой причине является нецелесообразным применение различных, специфических типов регуляторов температуры для управления различными объектами.

Исходя из сказанного выше, регулятор должен обеспечивать максимально точное поддержание температуры на различных объектах, в условиях постоянных внешних воздействий на контролируемый им параметр.

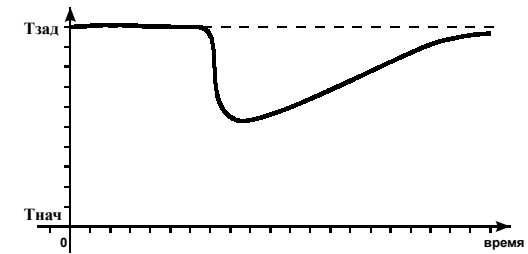


Рис.7

Не стоит забывать, что к подобным результатам может приводить неправильная установка любого параметра ПИД-закона, и изменение любого из них ведет за собой изменение остальных. Только последовательный подбор каждого параметра в отдельности и проверка системы на разных режимах работы приведет к правильному результату. Нельзя оценивать влияние на систему какого-либо параметра только по одному режиму работы. Только комплексный подход и понимание процессов, происходящих в системе, помогут достичь результата.

Отдельно следует отметить влияние на работу регулятора таких параметров, как период ШИМ и ограничение максимальной мощности в нагрузке.

Если для коммутации тока в нагрузке не применяются механические коммутирующие элементы (реле, пускатели и т.п.), то следует устанавливать значение периода ШИМ, равное 2 сек. Если же существует опасность быстрого выхода из строя механических коммутирующих элементов вследствие их частого срабатывания, то необходимо увеличить период ШИМ до значения 20-30 сек. Большее увеличение значения этого параметра может привести к нарушению работы ПИД-закона вследствие значительных задержек с момента принятия регулятором решения об изменении мощности в нагрузке до включения нагрева в следующем цикле формирования ШИМ.

Для систем, использующих режим формирования импульсного сигнала управления задвижкой, период ШИМ выбирается приблизительно равным или чуть большим максимального времени движения исполнительного механизма из одного крайнего положения в другое.

Если в инерционной системе имеется значительный запас мощности нагревателей, то это может приводить к значительному перерегулированию как при выходе на заданную температуру, так и в процессе работы. Характер колебательного процесса в таком случае будет соответствовать Рис.8.

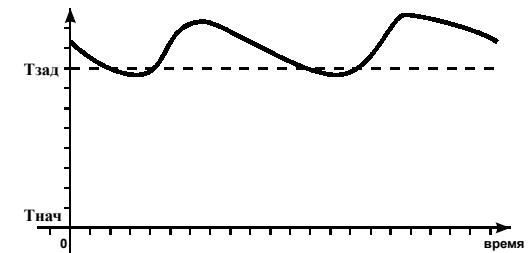


Рис.8

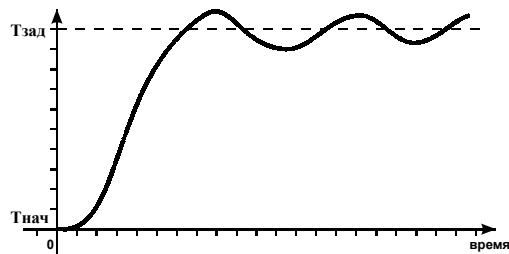


Рис.5

Оптимальным считается время дифференцирования в диапазоне от 30-50 сек. до 180-200 сек.

Можно исходить из того, что время дифференцирования должно быть в пределах от 1/8 до 1/3 периода колебаний температуры в режиме незатухающих колебаний. При этом увеличение времени дифференцирования, как правило, успокаивает колебания, но отрицательно сказывается на переходных процессах.

Если увеличение времени дифференцирования более чем в 2-3 раза не успокаивает систему, значит колебания вызваны неправильной установкой коэффициента пропорциональности. При этом подобные колебания может вызывать как слишком большой коэффициент пропорциональности, так и слишком маленький. Не следует забывать и о том, что увеличение времени квантования приводит к результатам, похожим на уменьшение коэффициента пропорциональности и наоборот уменьшение времени квантования аналогично увеличению коэффициента пропорциональности.

Более точно время дифференцирования можно определить по реакции на ступенчатое возмущающее воздействие.

При попытке компенсировать внезапный провал температуры, завышенное время дифференцирования приводит к перерегулированию вверх и длительному успокоению колебаний (Рис.6).

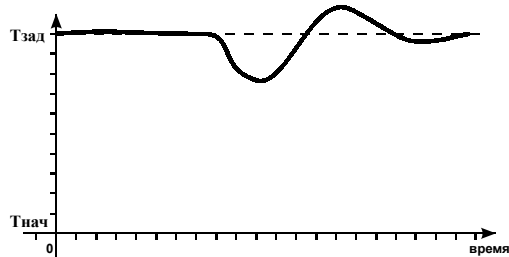


Рис.6

Наоборот, слишком маленькое время дифференцирования приводит к малой чувствительности регулятора на увеличение скорости изменения температуры, в результате чего провал может быть слишком большим, а возвращение к заданной температуре также займет слишком много времени (Рис.7).

Как мы уже выяснили, объекты регулирования могут быть самые разные. И для каждого из них существует свой оптимальный алгоритм управления. Мы же будем рассматривать только те из них, которые могут управляться с помощью двух законов регулирования – двухпозиционным и ПИД-законом.

Двухпозиционный закон регулирования самый простой. Если температура объекта меньше заданной – включаем нагреватели на 100% мощности, если больше заданной – полностью выключаем нагрев.

Если бы тепло от нагревателей мгновенно распространялось по всему объему объекта и достигало датчика и если бы датчик, нагреватели и управляющий прибор не имели никакой инерционности, то температура объекта была бы равна заданной и проблема поддержания температуры была бы решена. Но в реальности все намного сложнее. Пока будет разогреваться весь объем объекта, пока на выходе датчика установится значение сигнала, соответствующее заданной температуре, пока регулятор выключит напряжение в нагревателях, последние успеют разогреться до гораздо большей температуры, чем необходимо. И уже после выключения нагревателей это избыточное тепло будет продолжать греть наш объект. В результате температура поднимется несколько выше заданной. Далее при остывании объекта до заданной температуры нагреватели опять не смогут мгновенно прогреть весь объем и температура опустится ниже заданной. Такие колебания будут продолжаться всегда. А их период и амплитуда будут зависеть, в общем случае от инерционности системы регулирования (объект плюс регулятор), запаса мощности нагревателей, величины тепловых потерь всей системы. Для некоторой компенсации такой погрешности вводят поправку на момент включения и выключения нагрева – включают нагрев чуть раньше, чем температура опустится до заданной, а при повышении температуры выключают нагреватели до того, как температура достигнет заданной. Такой способ называется введением гистерезиса в цепь включения нагрузки. Но при этом приемлемые характеристики можно получить только в малоинерционных системах и системах, где такие колебания температуры допустимы. В реальных промышленных системах колебания температуры при двухпозиционном способе регулирования могут составлять от $\pm 1..2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10..15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, двухпозиционные регуляторы температуры могут быть с успехом использованы только в системах с малой инерционностью. Соотношение времени транспортного запаздывания (τ) к постоянной времени (T) таких объектов должно быть не больше 0,1

$$\frac{\tau}{T} < 0,1$$

Если же в системе требуется поддерживать довольно точно заданную температуру, то применяют другие законы регулирования, например пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорционально-интегральный-дифференциальный (ПИД). Такие способы позволяют скомпенсировать некоторую инерционность объекта, точно дозировать мощность в нагрузку и в результате добиться более точного поддержания температуры.

ПИД-закон регулирования, как наиболее универсальный из выше названных, в промышленных системах регулирования температуры применяется чаще всего. Хотя и здесь есть ограничение на соотношение времени транспортного запаздывания к постоянной времени объекта:

$$\frac{\tau}{T} < 1$$

При определенных параметрах ПИД закона, он может быть превращен как в пропорциональный или пропорционально-интегральный, так и в двухпозиционный.

Но наличие этих самых параметров и требует их определения для конкретного объекта регулирования.

В общем случае необходимая мощность в нагрузке вычисляется исходя из значения текущего рассогласования температуры (пропорциональная составляющая), значения скорости изменения температуры в данный момент (дифференциальная составляющая), и характера поведения температуры объекта за некоторый предыдущий период времени (интегральная составляющая). Если знать еще и чувствительность объекта к изменению средней мощности в нагрузке (коэффициент усиления), то можно записать формулу ПИД-закона регулирования, по которой в любой момент можно определить необходимое изменение мощности для поддержания заданной температуры:

$$\Delta U(t) = Kp(e(t) + 1/Ti \int_0^t e(t)dt + Td \frac{de(t)}{dt}), \text{ где}$$

- $e(t)$ - разница между заданной и реальной температурой в данный момент;
- Kp - коэффициент пропорциональности (коэффициент усиления) системы;
- Ti - постоянная времени интегрирования системы;
- Td - постоянная времени дифференцирования системы.

Существует много способов определения характеристик объекта регулирования. Например, при ступенчатом изменении мощности в нагрузке, по форме кривой изменения температуры можно вычислить некоторые параметры, необходимые для работы ПИД-закона регулирования.

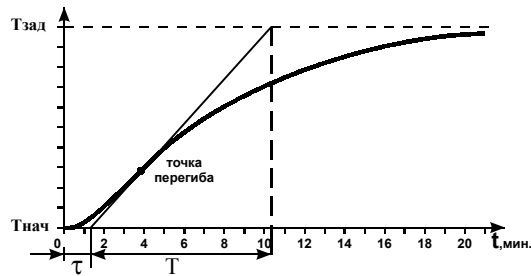


Рис.1

Важно помнить, что приведенный график отображает выход на заданную температуру не с температуры окружающей среды, а с некоторой начальной температуры объекта вблизи рабочей точки системы.

Для различных систем существует много эмпирических формул определения параметров ПИД-закона по измеренному времени транспортного запаздывания (τ) и постоянной времени объекта (T). Например, для аperiodического процесса регулирования:

$$Kp = \frac{0,95}{K_{ou} * \tau / T}; \quad Ti = 2,4T; \quad Td = 0,4T, \text{ где } K_{ou} - \text{коэффициент усиления объекта.}$$

Для процесса с перерегулированием:

$$Kp = \frac{1,2}{K_{ou} * \tau / T}; \quad Ti = 2T; \quad Td = 0,4T.$$

воздействием внешних возмущений, можно будет более точно установить время квантования.

Коэффициент пропорциональности может принимать любое значение от 1,0 до 25,0 процентов мощности на $^{\circ}C$. При этом, чем более чувствительна система к изменению мощности в нагрузке, тем меньше должен быть коэффициент пропорциональности. Довольно точно можно оценить текущий коэффициент пропорциональности по разгонной кривой с выключенным режимом самонастройки. Если коэффициент пропорциональности имеет значение меньше оптимального, то при выходе на режим будет наблюдаться слишком раннее выключение мощности в нагрузке, в результате чего заданная температура будет достигаться медленно, как бы за два захода, как на Рис. 3.

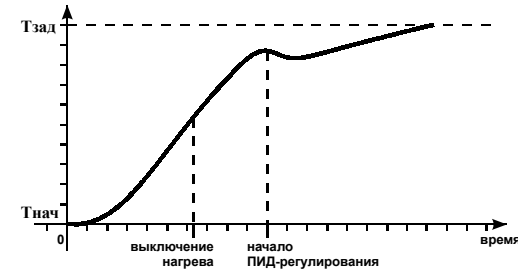


Рис.3

Напротив, слишком большой коэффициент пропорциональности приводит к значительному перерегулированию на разгонной кривой подобно Рис.4.

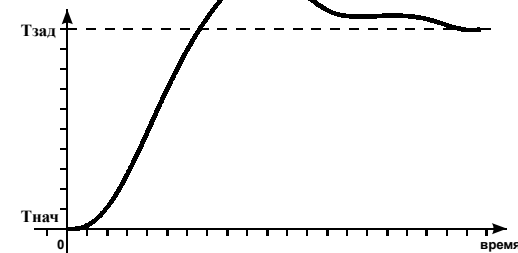


Рис.4

Необходимо учитывать, что график подобный Рис.3 можно получить, если при оптимальном коэффициенте пропорциональности будут завышены время квантования или время дифференцирования. Соответственно Рис.4 мы получим при занижении времени квантования или времени дифференцирования.

Если же разгонная кривая соответствует Рис.2, то для начала можно оставить значения времени квантования и коэффициента пропорциональности и перейти к оценке динамических свойств системы.

Если в процессе работы системы в установившемся режиме, т.е. без внешних возмущающих воздействий, температура все время колеблется вокруг заданной (Рис.5), то причиной, скорее всего, может быть слишком маленькое время дифференцирования.

систем. Но если отбросить фактор времени, то можно настроить практически любую систему регулирования.

Регуляторы температуры МикРА 600, МикРА 601 имеют режим ручной установки параметров ПИД-закона. Для этого необходимо в настроенном меню установить значение параметра $P_N = 1$. Если прибор в это время уже включил режим самонастройки, то его необходимо прервать – в любом из режимов индикации времени квантования, времени дифференцирования или коэффициента пропорциональности нажать одновременно кнопки ”▼” и “▲”. При этом точка в левом разряде, рядом с символом, обозначающим данный параметр, должна погаснуть.

Прежде всего, необходимо правильно определить те параметры работы системы, которые не соответствуют требуемым. Необходимо точно выяснить: в каких ситуациях и при каких режимах работы оборудования значение температуры выходит за границу допустимого. Связано ли это с работой системы в установившемся режиме или колебания проявляются в результате внешних воздействий. Внимательно изучить, как ведет себя система при выходе на заданную температуру и в различных ситуациях.

В правом разряде индикатора, внизу рядом с цифрой загорается точка в тот момент, когда регулятор дает команду на включение нагрузки. Необходимо убедиться, что всегда синхронно с включением этой точки, на нагреватели подается напряжение.

По соотношению времени включенного состояния точки и выключенного можно определить текущую мощность в нагрузке. Например, если время включенного состояния и время выключенного равны, то в данный момент на нагреватели подается 50% от максимальной мощности. Соответственно если точка все время светится, то мощность равна 100%, если не горит вообще – 0%. Регулятор может дозировать мощность в нагрузке с точностью до 0,5%. Период включения точки определяется установкой периода ШИМ выходного сигнала (Control Period).

Необходимо записать какие параметры рассчитывал регулятор в процессе самонастройки.

Желательно иметь результаты нескольких процессов выхода на заданную температуру с температуры окружающей среды. При этом необходимо определить те параметры, которые явно выходят за рамки типовых для подобного оборудования, и начинать настройку регулятора, изменяя за один раз не более одного параметра.

При неправильном вычислении одного из параметров некорректно будут влиять на процесс и остальные параметры ПИД-закона. Например, слишком большое время квантования приводит к тому, что только при завышенном коэффициенте пропорциональности можно добиться приемлемого регулирования хотя бы в некоторых режимах работы. Связано это с тем, что при уменьшении времени квантования регулятор более часто меняет мощность в нагрузке. При малом коэффициенте пропорциональности, не дожидаясь результата предыдущего изменения мощности, регулятор за несколько шагов установит ту же мощность, что и за один шаг при больших коэффициенте пропорциональности и времени квантования.

Время квантования следует выбирать в пределах от $0,2 \cdot \tau$ до τ . Для большинства объектов, которые используются в промышленном оборудовании время квантования находится в пределах от 2 сек. до 15-20 сек. Для начала лучше попробовать настроить остальные параметры при значении времени квантования от 5 до 10 сек. И только для очень инерционных объектов можно использовать значения больше 15 – 20 сек. В дальнейшем, по результатам работы на переходных режимах под

Другой способ состоит в установлении в системе незатухающих колебаний путем перехода к двухпозиционному закону управления. В результате период колебаний такой системы T_{kp} позволяет выбрать $T_i = T_{kp} / 2$, и $T_d = T_{kp} / 5$.

Коэффициент пропорциональности выбирается из условия:

$$\frac{K_p}{K_{kp}} = \frac{A_{dop}}{A_{kp}}, \text{ где}$$

K_{kp} - коэффициент пропорциональности, при котором достигнуты незатухающие колебания с амплитудой A_{kp} .

A_{dop} - допустимая амплитуда колебаний температуры в рабочем режиме.

Учитывая, что в каждой конкретно системе существуют еще и неперiodические внешние возмущающие воздействия различного характера, все коэффициенты в приведенных формулах могут меняться для получения оптимального поведения системы в конкретных условиях. Параметры, подобранные для наилучшего поддержания температуры в установившемся режиме, могут оказаться совершенно неприемлемыми для подавления переходного процесса при внешнем воздействии или при выходе на режим. Равно как и наоборот. Кроме того, в процессе работы характеристики объекта регулирования могут значительно меняться, как при изменении режимов работы, так и со временем.

Обычно вычисленные значения требуют многократной корректировки и подбора, а изменение одного параметра влечет за собой необходимость корректировки остальных.

Очевидно, что выбор параметров ПИД закона для определенной системы регулирования температуры – задача не из легких. А учитывая довольно большую инерционность большинства объектов и длительность процессов установления температуры – еще и трудоемкая, требующая больших затрат времени.

Для облегчения этого процесса во всех ПИД-регуляторах температуры МикРА реализован алгоритм автоматической настройки параметров регулирования на заданный объект.

Данный алгоритм самонастройки оптимизирован для типовых систем регулирования, которые чаще всего встречаются в промышленном оборудовании. Настройка производится в несколько этапов на разных режимах работы системы. Применение принципов нечеткой логики позволяет более гибко подходить к выбору параметров, определять необходимость включения самонастройки, подстраивать наиболее критичные параметры для наиболее важных режимов работы.

Кроме того, в регуляторах МикРА реализован дополнительный алгоритм регулирования температуры на переходных процессах, который дополняет ПИД-закон в условиях значительных внешних воздействий на объект регулирования.

Подробно описать принципы реализации регулирования и самонастройки регуляторов температуры МикРА в объеме этой статьи не представляется возможным. Важно то, что в большинстве случаев настройка регулятора на объект происходит автоматически в процессе работы, без участия оператора.

Каждый раз, вычисляя параметры системы, программа берет за основу, значения, полученные во время предыдущего сеанса настройки. Поэтому точность вычислений должна улучшаться с каждым последующим сеансом настройки, с каждым включением оборудования.

Основной процесс вычисления параметров ПИД-закона происходит при выходе системы на заданную температуру – настройка по разгонной кривой. При этом система должна работать в реальных условиях в рабочем, а не холостом режиме и на рабочей температуре.

Включение самонастройки происходит автоматически в следующих ситуациях:

- при включении прибора;
- при изменении заданной температуры.

Решение о необходимости включения режима самонастройки прибор принимает исходя из параметров, которые были вычислены ранее и хранятся в памяти, а также значения текущей температуры объекта в момент включения или изменения заданной температуры.

Самонастройка гарантировано включится, если при включении регулятора заданная температура выше текущей более чем на 5°C при $Kp = 25,0$ или 65°C при $Kp = 1,0$. Если это условие не выполняется, регулятор продолжает работать с использованием предыдущих параметров.

Необходимо, чтобы до момента включения самонастройки цепи управления нагревателями не были разорваны. Для регулятора очень важным является время от момента включения максимальной мощности в нагрузку до начала изменения температуры. И если нагреватели хотя бы некоторое время будут отключены от выхода регулятора, параметры объекта будут вычислены не правильно.

В процессе выхода на заданную температуру, регулятор сначала включает максимальную ее мощность в нагрузку. По достижении определенной температуры и скорости ее нарастания нагреватели отключаются. Процесс самонастройки заканчивается после остановки нарастания температуры по инерции. После этого новые параметры сохраняются в памяти, и прибор переходит в режим регулирования по ПИД-закону.

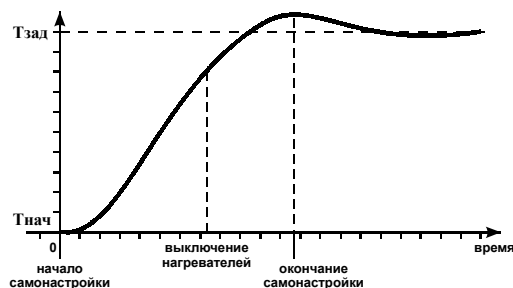


Рис.2

До окончания самонастройки необходимо обеспечить работу системы регулирования в стабильном режиме, не изменять характеристики объекта и рабочей среды, не выключать питание прибора и исполнительных механизмов.

Дальнейшая подстройка параметров происходит в процессе работы по мере необходимости и по результатам внешних воздействий на объект. Но такие изменения не сохраняются в памяти и действуют только для подавления колебаний температуры в процессе работы.

Если в результате самонастройки будут вычислены параметры, значительно отличающиеся от прежних, регулятор установит и сохранит в памяти значения, отличающиеся от предыдущих не более, чем в три раза. Таким образом, если в памяти регулятора были заведомо неправильные параметры, для окончательной настройки на данный объект может потребоваться несколько сеансов автонастройки.

Оптимальным является выход на заданную температуру с небольшим ($1...3^{\circ}\text{C}$) перерегулированием. Несоблюдение этого – первый признак неправильной настройки регулятора на объект, следовательно, необходимо дать возможность регулятору повторно пройти процесс самонастройки.

Если за несколько попыток регулятор не может правильно настроиться на объект или разгонная кривая близка к идеальной, но в процессе работы происходят значительные отклонения температуры от заданной, то система регулирования далека от оптимальной и без вмешательства квалифицированного специалиста не обойтись.

Здесь возможны два варианта решения проблемы.

Или попытаться изменить объект регулирования, обеспечив ему характеристики приемлемые для ПИД-регулирования и имеющегося алгоритма самонастройки, или (при наличии в регуляторе температуры ручного режима настройки параметров ПИД-закона) попытаться подобрать самостоятельно такие параметры, которые обеспечат более приемлемое регулирование температуры объекта.

Выбрав первый путь, в первую очередь необходимо проверить правильность установки и подключения датчика температуры. Должен обеспечиваться постоянный тепловой контакт датчика с рабочей средой и минимально возможная инерционность передачи тепла от нагревателей к датчику. Процесс теплопередачи может принципиально отличаться при низкой температуре в начале самонастройки и в диапазоне рабочих температур. Например, в воздушной среде при низких температурах преобладает передача тепла за счет конвекционных потоков, что при больших объемах рабочей зоны может вносить большое транспортное запаздывание. Тогда как при температуре выше $500-600^{\circ}\text{C}$ большое значение приобретает практически безинерционная передача тепла за счет излучения.

Необходимо убедиться, что датчик подключен правильно. Например, термопара, подключенная к прибору не компенсационным проводом, может вносить погрешность в измеряемую величину температуры, вызванную прогревом в процессе работы мест соединения термопарного провода и удлинительного.

Требуется, также, обеспечить постоянный тепловой контакт нагревателей и рабочей среды, надежные электрические контакты в силовых цепях.

Если имеется такая возможность, принять меры для уменьшения транспортного запаздывания в системе и снижения влияния внешних возмущающих воздействий. Обратит внимание на возможность взаимного влияния соседних зон нагрева. Если в процессе работы две соседние зоны нагрева имеют не постоянный контакт, возможно причина в неправильно выбранных рабочих температурах или неправильной калибровке датчиков или приборов.

Мощность нагревателей должна быть достаточной для обеспечения рабочей температуры при 30-40% максимальной мощности. Вместе с тем, слишком большой запас мощности при большой инерционности объекта регулирования может приводить к периодическому перегреву на переходных режимах работы. В такой ситуации может помочь функция ограничения максимальной мощности, реализованная в некоторых регуляторах температуры МикРА.

Второй путь заключается в установке таких параметров ПИД-закона, при которых поведение системы будет наиболее приемлемым.

Необходимо отметить, что задача эта не имеет однозначного решения со 100% результатом. Возможности программы регуляторов температуры МикРА достаточно большие. И если она не может справиться с данной системой регулирования, то эта система имеет довольно специфические свойства и ее поведение не может быть описано с помощью простых алгоритмов. Поэтому при отсутствии знаний в теории регулирования, необходим, как минимум, немалый опыт в настройке подобных